

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning documents *will not* correct images,
Please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.

19 Rec'd PCT/PTO 01 MAR 2002

**METHOD FOR MEASURING CURRENT AND PHOTOELECTRIC
CURRENT SENSOR**

Patent Number: JP11316247
Publication date: 1999-11-16
Inventor(s): ICHINOSE YUJI; SONE ISAMU
Applicant(s):: HITACHI LTD
Requested Patent: ☐ JP11316247
Application Number: JP19980122191 19980501
Priority Number(s):
IPC Classification: G01R15/24 ; G01R19/00 ; G01R33/032
EC Classification:
Equivalents:

Abstract

PROBLEM TO BE SOLVED: To reduce frequencies in phase modulation for offsetting the phase difference of a measured light due to a Faraday effect, and making current detecting sensitivity constant at all times in photocurrent measurement using the Faraday effect.

SOLUTION: Two coherent lights are allowed to propagate to opposite directions through a Faraday element 2 arranged around a conductor 1 through which currents are running, and currents running through the conductor are measured by using a Faraday effect generated in the both lights propagating to the opposite directions. In this case, phase modulation for offsetting a phase difference generated in the both lights due to the Faraday effect is composed of stepped waveform. Therefore, digital serrodyne phase modulation for obtaining the stepped form waveform is used for the phase modulation for offsetting the phase difference of the both lights due to the Faraday effect, and making the current detecting sensitivity constant at all times. Thus, it is possible to use a phase modulator capable of a measuring range in which the maximum phase difference is up to 360 deg. with high practicality necessitating relatively low responsiveness.

Data supplied from the esp@cenet database - I2

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平 1 1 - 3 1 6 2 4 7

(43) 公開日 平成 1 1 年 (1 9 9 9) 1 1 月 1 6 日

(51) Int. Cl. °

識別記号

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

G01R 15/24

G01R 15/07

B

19/00

19/00

V

33/032

33/032

審査請求 未請求 請求項の数 1 1 O L (全 1 0 頁)

(21) 出願番号

特願平 1 0 - 1 2 2 1 9 1

(22) 出願日

平成 1 0 年 (1 9 9 8) 5 月 1 日

(71) 出願人 0 0 0 0 0 5 1 0 8

株式会社日立製作所

東京都千代田区神田駿河台四丁目 6 番地

(72) 発明者 一ノ瀬 祐治

茨城県日立市大みか町七丁目 2 番 1 号 株

式会社日立製作所電力・電機開発本部内

(72) 発明者 曾根 勇

茨城県日立市大みか町七丁目 2 番 1 号 株

式会社日立製作所電力・電機開発本部内

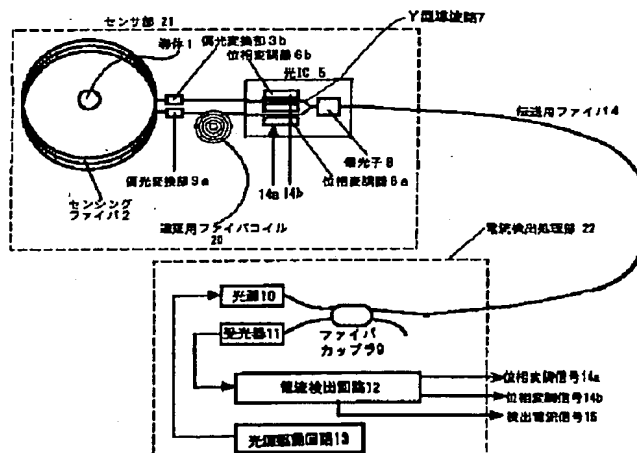
(74) 代理人 弁理士 高崎 芳紘

(54) 【発明の名称】 電流測定方法及び光電流センサ

(57) 【要約】

【課題】 ファラデ効果を利用した光電流計測に関して、ファラデ効果による測定光の位相差を相殺して電流検出感度が常に一定にするための位相変調における周波数を小さくできるようにする。

【解決手段】 電流が流れる導体 1 を周回するように配したファラデ素子 2 に、二つの可干渉性の光を互いに逆方向で伝播させ、この逆方向で伝播する両光に生じるファラデ効果を利用して導体に流れる電流を計測するについて、ファラデ効果で両光に生じる位相差を相殺するための位相変調を階段状の波形でなすようにしている。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 電流が流れる導体を周回するように配したファラデ素子に、二つの可干渉性の光を互いに逆方向で伝播させ、この逆方向で伝播する両光に生じるファラデ効果を利用して前記導体に流れる電流を計測する電流測定方法において、ファラデ効果で両光に生じる位相差を相殺するための位相変調を階段状の波形でなすようにしたことを特徴とする電流測定方法。

【請求項 2】 電流が流れる導体を周回するように配したファラデ素子と、測定用の光を与える光源と、この光源からの光を二つに分岐し、この二つに分岐した各光を、これらが互いに逆方向で伝播するように前記ファラデ素子に入力させる分岐手段と、ファラデ素子からのその出力光を再び結合させる再結合手段と、この再結合手段で再結合した光の強度を検出する検出手段と、この検出手段からの信号に基づいて第 1 の位相変調信号と第 2 の位相変調信号を発生する変調信号発生手段と、前記第 1 の位相変調信号により、前記互いに逆方向伝播させる一方の光に位相変調を施す第 1 の位相変調手段と、及び前記第 2 の位相変調信号により、前記互いに逆方向伝播させる他方の光に位相変調を施す第 2 の位相変調手段を備え、そして前記第 2 の位相変調信号が階段状の波形である光電流センサ。

【請求項 3】 上記第 1 の位相変調信号による一方の光の位相変調は、正弦波又は方形波の位相変調制御とし、上記第 2 の位相変調信号に他方の光の位相変調は階段状のセロサイン位相変調制御とした請求項 2 に記載の光電流センサ。

【請求項 4】 分岐手段により分岐された 2 つの光がそれぞれ伝播する二つの光路の少なくとも一方に、分岐手段から再結合手段までの光の伝播時間を長くするための光路延長部を設けた請求項 2 に記載の光電流センサ。

【請求項 5】 分岐手段からファラデ素子までの二つの光路をそれぞれ光ファイバで形成し、且つこの二つの光路用の光ファイバの間隔を固定化できるようにした請求項 2 または請求項 4 に記載の光電流センサ。

【請求項 6】 分岐手段から再結合手段までの間における各光路の温度を均一に保つようにした請求項 2 ～請求項 5 の何れか 1 項に記載の光電流センサ。

【請求項 7】 光源として、干渉距離が短い低コヒーレンスの光源を用いた請求項 2 ～請求項 6 の何れか 1 項に記載の光電流センサ。

【請求項 8】 変調信号発生手段を含む電流検出処理部と、位相変調手段を含むセンサ部とを有すると共に、前記電流検出処理部の変調信号発生手段が与える位相変調信号を前記センサ部の位相変調手段に光信号を介して伝送するための信号伝送手段を有している請求項 2 ～請求項 7 の何れか 1 項に記載の光電流センサ。

【請求項 9】 変調信号発生手段を含む電流検出処理部と、位相変調手段を含むセンサ部とを有すると共に、前

記センサ部に駆動用電源を光エネルギーを介して供給するための電力伝送手段を有している請求項 2 ～請求項 8 の何れか 1 項に記載の光電流センサ。

【請求項 10】 ファラデ素子として光ファイバを用い、この光ファイバに円偏光または楕円偏光を伝播させるようにした請求項 2 ～請求項 9 の何れか 1 項に記載の光電流センサ。

【請求項 11】 ファラデ素子として光ファイバを用い、この光ファイバに無偏光を伝播させるようにした請求項 2 ～請求項 9 の何れか 1 項に記載の光電流センサ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、導体に流れる電流を計測する技術に関し、特に導体に周回させたファラデ素子におけるファラデ効果を利用して電流を計測する技術に関する。

【0002】

【従来の技術】ファラデ効果を利用した電流計測については、例えば特開昭 56-55864 号、特開昭 63-263469 号、特表平 7-502596 号、特開平 7-191060 号などの各公報に開示の技術が知られている。ファラデ効果を利用して電流を計測するには、一般に、例えば光ファイバのようなファラデ効果を生じるファラデ素子が用いられる。すなわち電流が流れる導体の周囲を周回させるように配したファラデ素子に、一つの光源からの光を二つの光路に分岐して得た可干渉性の二つの光を互いに逆方向で伝播させ、この伝播中に導体の電流によるファラデ効果で両光に生じる位相差を再結合後の両光の干渉を利用して測定することにより導体に流れる電流を計測する。尚、異なる分野であるジャイロに適用した例としては「光ファイバ応用部品 (2) - 光ファイバジャイロへの応用」(保立保夫、「光学」1990 年 7 月号、P 473～479)がある。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】上記のようなファラデ効果を利用した電流計測では、測定精度を高めるなどのために、測定用の光に位相変調を施すのが一般である。例えば上記特開平 7-191060 号広報に開示の例に見られるように、バイアス位相変調を施すのに加えて、ファラデ効果による両光の位相差を相殺するためのセロサイン位相変調も施すことで、測定精度を高めることができる。しかしこれらの位相変調の実施は必ずしも容易でない。

【0004】すなわち従来ではセロサイン位相変調を振幅 2π で折り返す鋸波で行っており、その変調周波数を f とすれば、電流による両光の位相差 ϕ_s と同じ位相差を発生させるために、 $f = \phi_s / (2\pi\tau)$ の周波数で制御する必要がある。そしてその鋸波の波形が乱れると上記式の関係が成立しなくなって周波数 f から正しい電流値を求めることができなくなるため、変調周波数 f の 10 倍以上の応答性を持つ位相変調器が必要となるが、そ

れを得ることは容易でない。

【 0 0 0 5 】 また例えば一定の振幅と周波数で変調するバイアス位相変調は、測定用の光が分岐してファラデ素子を伝播した後に再び結合するまでの伝播時間 τ の逆数の $1/2$ 倍以上の周波数が必要であり、例えば伝播長を $3m$ とすれば $50MHz$ 以上の周波数にしなければならない。このため極めて高い応答性を持つ位相変調器が必要となるが、同じくこれを得ることも容易でない。

【 0 0 0 6 】 またファラデ効果を利用した電流計測では、一般に、二つに分岐させた光をそれぞれ光ファイバでファラデ素子に導き、またファラデ素子から導くようにしている。この場合、両光を導光するための 2 本の光ファイバで囲われた領域が回転すると、サニャック効果が生じてファラデ素子における電流によるのと同様な位相差が両光に発生して測定誤差をもたらす可能性があるが、この点について従来の技術では配慮がなされていない。同様な問題は、2 本の光ファイバに温度分布を生じる場合にもある。つまり 2 本の光ファイバの温度が異なると、これに起因して電流によるのと同様な位相差が両光に発生して測定誤差をもたらす可能性があるが、この点について従来の技術では配慮がなされていない。

【 0 0 0 7 】 尚、上記公知例の中で、特開昭 56-55864 号はサニャック干渉光学系でバイアス変調し且つ電流により発生する位相差を打ち消すように位相を制御するものである。しかし、かかる公知例には位相差を相殺する具体的な位相波形は示されていない。

【 0 0 0 8 】 したがって本発明の目的は、ファラデ効果を利用した電流計測における上記のような問題点を効果的に解消することにある。

【 0 0 0 9 】

【課題を解決するための手段】 本発明では、電流が流れる導体を周回するように配したファラデ素子に、二つの可干渉性の光を互いに逆方向で伝播させ、この逆方向で伝播する両光に生じるファラデ効果を利用して前記導体に流れる電流を計測する電流測定方法について、ファラデ効果で両光に生じる位相差を相殺するための位相変調を階段状の波形でなすようにしている。

【 0 0 1 0 】 本発明は、電流が流れる導体を周回するように配したファラデ素子と、測定用の光を与える光源と、この光源からの光を二つに分岐し、この二つに分岐した各光を、これらが互いに逆方向で伝播するように前記ファラデ素子に入力させる分岐手段と、ファラデ素子からのその出力光を再び結合させる再結合手段と、この再結合手段で再結合した光の強度を検出する検出手段と、この検出手段からの信号に基づいて第 1 の位相変調信号と第 2 の位相変調信号を発生する変調信号発生手段と、前記第 1 の位相変調信号により、前記互いに逆方向伝播させる一方の光に位相変調を施す第 1 の位相変調手段と、及び前記第 2 の位相変調信号により、前記互いに逆方向伝播させる他方の光に位相変調を施す第 2 の位相

変調手段を備え、そして前記第 2 の位相変調信号が階段状の波形である光電流センサを開示する。

【 0 0 1 1 】 また本発明では、上記のような電流測定方法に用いる光電流センサを以下のような構成としている。すなわち本発明による光電流センサは、電流が流れる導体を周回するように配したファラデ素子、測定用の光を与える光源、この光源からの光を二つに分岐する分岐手段、この分岐手段で分岐した各光を、これらが互いに逆方向で前記ファラデ素子を伝播した後に、再び結合させる再結合手段、この再結合手段で結合した光の強度を検出する検出手段、この検出手段からの信号に基づいて第 1 の位相変調信号と第 2 の位相変調信号を発生する変調信号発生手段、前記第 1 の位相変調信号により前記各光に位相変調を施す第 1 の位相変調手段、及び前記第 2 の位相変調信号により前記各光に位相変調を施す第 2 の位相変調手段を備え、そして前記第 2 の位相変調信号が階段状の波形とされている。

【 0 0 1 2 】 また本発明では、上記のような光電流センサについて、分岐手段により分岐された 2 つの光がそれぞれ伝播する二つの光路の少なくとも一方に、分岐手段から再結合手段までの光の伝播時間を長くするための光路延長部を設けるようにしている。

【 0 0 1 3 】 このように、光路延長部を設けて光の伝播時間を長くすることで、上記のように伝播時間の逆数の $1/2$ 倍以上必要となるバイアス位相変調の周波数を小さくすることがでる。すなわち従来技術にあっては、光の伝播時間が実質的にファラデ素子における光路長で決まり、またファラデ素子の光路長も所定の条件で定まることから、自ずと光の伝播時間に限界があり、このためにバイアス位相変調の周波数を小さくすることができなかった。これに対し、本発明によると、光路延長部を設けたことにより、上記のようにバイアス位相変調の周波数を小さくすることができ、したがってバイアス位相変調用の位相変調器に必要な応答性も従来に比べ低くて済む。

【 0 0 1 4 】 また本発明では、上記のような光電流センサについて、分岐手段からファラデ素子までの二つの光路をそれぞれ光ファイバで形成し、且つこの二つの光路用の光ファイバの間隔を固定化できるようにしている。

【 0 0 1 5 】 このようにすることで、上記したサニャック効果による測定誤差を抑えることができる。すなわちサニャック効果は、二つの光路用の光ファイバつまり 2 本の光ファイバで囲まれる面積に比例する。したがって 2 本の光ファイバの間隔を最小にして、これを固定化することで、2 本の光ファイバで囲まれる面積を小さくすることができ、サニャック効果による測定誤差を抑えることができる。このような 2 本の光ファイバの間隔固定化は、例えば 2 本の光ファイバを互いにツイストさせる方法、あるいは 2 本の光ファイバを同一の被覆で覆う方

法などにより実現できる。

【0016】また本発明では、上記のような光電流センサについて、分岐手段から再結合手段までの間における各光路の温度を均一に保つようにしている。各光路の温度の均一化を図るには、例えば分岐手段から再結合手段までの光路要素を一体の筐体で囲い、且つ断熱材で断熱するようにする方法が可能である。このようにすることで、2本の光ファイバの温度状態に起因する測定誤差を抑えることができる。

【0017】また本発明では、上記のような光電流センサについて、光源として、干渉距離が短い低コヒーレンスの光源を用いるようにしている。このように、干渉距離が短い光源を用いることで、各光学要素間における接合部での戻り光などによる干渉の影響を抑えることができ、測定精度を高めることができる。

【0018】また本発明では、上記のような光電流センサについて、変調信号発生手段を含む電流検出処理部と、位相変調手段を含むセンサ部とを設けると共に、前記電流検出処理部の変調信号発生手段が与える位相変調信号を前記センサ部の位相変調手段に光信号を介して伝送するための信号伝送手段を設けるようにしている。このようにすることで、電流検出処理部をセンサ部から電気的に絶縁することができ、センサ部を介してサージ電流の影響が電流検出処理部に及ぶのを防止することができる。

【0019】また本発明では、上記のような光電流センサについて、変調信号発生手段を含む電流検出処理部と、位相変調手段を含むセンサ部とを設けると共に、前記センサ部に駆動用電源を光エネルギーを介して供給するための電力伝送手段を設けるようにしている。この構成も上記と同様に電流検出処理部をセンサ部から電気的に絶縁してサージ電流の影響が電流検出処理部に及ぶのを防止するのに機能する。

【0020】上記のような本発明による光電流センサについては、ファラデ素子として光ファイバを用い、この光ファイバに円偏光または楕円偏光を伝播させるようにすることが可能であり、また同じくファラデ素子として光ファイバを用い、この光ファイバに無偏光を伝播させることも可能である。円偏光または楕円偏光を伝播させる場合には、ファラデ素子に入射する光の光路中に光を円偏光または楕円偏光に変換する偏光変換手段を設け、一方、無偏光を伝播させる場合には、ファラデ素子に入射する光の光路中にデポラライザを設ける。デポラライザによる無偏光を用いることには、ファラデ素子を伝播する際の光の直交成分間の干渉を抑えることができるという利点があり、一方円偏光や楕円偏光を用いることには、より高い感度を得られるという利点がある。

【0021】

【発明の実施の形態】図1に第1の実施形態による光電流センサの構成を示す。図に見られるように、電流検出

処理部22に設けてある例えばレーザダイオードなどによる光源10から光源駆動回路13の制御の下で出力された光は、ファイバカップラ9を通過後、伝送用ファイバ4を介してセンサ部21に伝送される。センサ部21では、そこに設けてある偏光子8により光を直線偏光化する。この直線偏光した光は、光1C5の上に形成されているY型導波路7により2つに分岐される。したがってこの場合、Y型導波路7は分岐手段として機能する。分岐した光の一方(右回り波)は、正弦波または方形波によるバイアス位相変調を第1の位相変調手段である位相変調器6aで受け、他方(左回り波)は、階段状のデジタルセロダイン位相変調を第2の位相変調手段である位相変調器6bで受ける。

【0022】位相変調器6aを出た光は、光路延長部であるファイバコイル20を伝播し、それから偏光変換部3aで直線偏光から円偏光に変換された後、光ファイバを用いたファラデ素子であるセンシングファイバ2に例えば右回りで入射する。センシングファイバ2は、測定対象の電流(直流と交流とがあるが、簡単のため、直流電流とする。交流の扱いは直流と同様の考え方によるが、それは各サンプル点においてであり、交流電流については後述の図3で簡単に説明した)が流れる導体1に少なくとも1回以上周回されており、これを伝播した右回りの光は、偏光変換部3bで円偏光から直線偏光に再度変換された後、位相変調器6bでデジタルセロダイン位相変調を受け、それからY型導波路7に戻る。

【0023】一方、位相変調器6bを出た光は、偏光変換部3bで直線偏光から円偏光に変換され、それからセンシングファイバ2に入射してこれを上記右回り光とは逆の左回りで伝播した後、偏光変換部3aで円偏光から直線偏光に変換され、また位相変調器6aでバイアス位相変調を受けてからY型導波路7に戻り、上記右回り光と再び結合する。したがってこの場合、Y型導波路7は再結合手段として機能する。Y型導波路7で左右各回りの光が結合すると干渉光が得られる。この干渉光は、再び偏光子8を通過した後、伝送用ファイバ4及びファイバカップラ9を介して検出手段である受光器11に入射し、その強度が検出される。そして受光器11の出力を受ける電流検出回路12は、干渉光の強度から導体に流れる電流を検出し、検出電流信号15として出力する。

【0024】以上のような光電流センサにおける位相変調について以下でさらに詳しく説明する。位相変調器6aで実施するバイアス位相変調は、受光器11の出力を受けて電流検出回路12で生成される位相変調信号14aにより実施され、振幅が π 以下の正弦波または方形波の波形を持つ。したがって本実施形態では電流検出回路12が変調信号発生手段としても機能する。このようなバイアス位相変調を行うと受光器11で検出される干渉光の強度信号の中にバイアス位相変調の周波数f bの整数倍の周波数成分が検出される。各周波数成分の強度

は、干渉光を与える左右各回りの光に、センシングファイバ2を伝播する際のファラデ効果により、生じる位相差 ϕ_s の正弦関数または余弦関数に比例する。したがって干渉光に含まれる特定の周波数成分の強度から位相差 ϕ_s を検出することができる。そして位相差 ϕ_s は、導体1に流れる電流の量に比例するので、導体1における電流を計測することができる。このように、単に干渉光の強度から位相差を検出するのではなく、干渉光に含まれる特定の周波数成分の強度から位相差を検出することにより、高いS/Nでの検出が可能となる。

【0025】一方、位相変調器6bで実施するデジタルゼロダイン位相変調は、電流検出の感度を常に同一にするのに機能する。すなわち上述したようにバイアス位相変調による周波数成分は、位相差 ϕ_s の正弦関数や余弦関数に比例する。このため周波数成分の強度から直接的に検出出力を得るとすると、位相差 ϕ_s により感度が異なるという問題が発生するが、位相変調器6bによる位相変調で位相差 ϕ_s を相殺することにより、この問題を解消することができる。そのために、デジタルゼロダイン位相変調は、電流検出回路12で生成される位相変調信号14bにより実施され、階段状の波形による位相変調を受ける。その階段状の波形は、図2の(a)に示すように、測定用の光がY型導波路7で分岐してセンシングファイバ2を伝播した後にY型導波路7で再び結合するまでの伝播時間 τ と等しい持続時間の平坦部を有し、またその大きさが ϕ_p である段差を各平坦部の間に有する。そしてこの段差 ϕ_p を上記の左右各回り光の位相差 ϕ_s と一致させるようにする。つまり位相差 ϕ_s と同じか、あるいは位相差 ϕ_s との差が常に同じとなるように段差 ϕ_p を制御することにより、段差 ϕ_p で位相差 ϕ_s を相殺することができ、バイアス位相変調による周波数成分の強度が電流に関わりなく一定となり、したがって電流量に影響されることなく常に同一の感度で電流値を検出することが可能となる。

【0026】このようにデジタルゼロダイン位相変調における波形を階段状とすることは、上述のように、位相変調器6bの応答性を低いもので済ませることを可能とする。このことを従来技術における図2の(b)に示すような鋸波によるゼロダイン位相変調と比較して説明すると以下のとおりである。鋸波による変調の周波数 f とすれば、電流による位相差 ϕ_s と同じ位相差を発生させるために、 $f = \phi_s / (2\pi\tau)$ の周波数で制御する必要がある。そしてその鋸波の波形は乱れがなくて直線的に変化するものでなければ上記式の関係を満足させることができず、周波数 f から正しい電流値を求めることができなくなる。このため変調周波数 f の10倍以上の応答性を持つ位相変調器が必要となり、また広い測定範囲を実現するためには周波数 f を可変する広帯域の発振器が必要となる。一方、本発明における階段状の位相変調を実施するには、伝播時間と同等程度の応答性があれば足

り、したがって位相変調器6bに必要な応答性が低くて済み、また広い測定範囲を実現するについてもそれほど広い帯域を必要としない。なお図2は、導体1に流れる電流が直流の場合の例であるが、交流の場合には、交流波形に応じて左回り光に対して図3に示すような階段状位相変調を行う。即ち、交流波形をサンプルし、そのサンプル点 S_1 、 S_2 毎に、その振幅値に応じて振幅値が大きい場合には ϕ_p を大きくする如き、階段状の位相変調を行う。この場合の電流の正負は、階段時の位相変調と同時に実施されるバイアス変調により判断することができる。

【0027】次に、本実施形態における光路延長部としてのファイバコイル20の働きについて説明する。センシングファイバ2で生じるファラデ効果における感度(ベルデ定数)は、センシングファイバ2の材質や伝播させる光の波長により異なるが、おおむね $10^{-4} \sim 10^{-3}$ [deg/AT]程度である(単位は導体への周回数及び電流当たりに変化する位相差の量を表す)。本実施形態における電流検出回路12で検出できる最大の位相差 ϕ_s は360degであり、ベルデ定数を 10^{-3} [deg/AT]とすれば、導体1にセンシングファイバ2を1回巻いた場合の最大検出電流値は360000Aとなる。一方、電流検出回路12には検出限界(下限値)があり、本実施形態の光電流センサを設置するには測定すべき導体の電流測定範囲に合わせてセンシングファイバの巻数を変えることにより、電流検出感度を測定範囲に合うように調整する。例えばGIS(ガス遮断機)等の送変電設備においては大電流化しており、センシングファイバの巻数を1回程度として、最大測定電流を大きく設定する必要が生じる。この場合、センシングファイバを導体に周回させる径を1mとすれば、左右各回りの光の伝播時間は約 10^{-8} 秒となる。そしてバイアス位相変調信号は伝播時間 τ の間で少なくとも半周期以上は伝播する必要があるので、バイアス位相変調の周波数は50MHz以上必要となり、位相変調器に非常に高い応答性が要求されることになる。またデジタルゼロダイン位相変調信号も伝播時間単位で波形が変化するので、同じく伝播時間が短いほど位相変調器に高い応答性が要求されることになる。このことは逆に言えば、伝播時間 τ を長くすることで、位相変調器に必要な応答性を低くできることを意味しているが、この伝播時間 τ を長くすることに機能するのがファイバコイル20である。例えばバイアス位相変調については、その周波数 f と伝播時間 τ の関係を $f\tau = k/2$ (但し、 $k=0.05 \sim 1$)とするのが好ましいとされ、またバイアス位相変調用の位相変調器として現在実現可能な周波数の上限は10MHz程度であるのが実情である。したがってこのような条件を満足させる伝播時間 τ を実現できる長さをファイバコイル20に設定することになる。またこのファイバコイル20にはファラデ効果を生じ難い光ファイバを用いるようにする。

【0028】本実施形態における偏光変換部3は、図4に示すような構成とすることができる。この偏光変換部3は、光IC5から光ファイバを介して伝播して来る直線偏光を平行光にするためのレンズ17a、このレンズ17aを通過した直線偏光の光軸に対してその光軸が45deg 傾くように配した1/4波長板19、及びこの1/4波長板19を通過して円偏光化した光をセンシングファイバ2に効率的に入射させるための集光用のレンズ17bからなる。

【0029】本実施形態では上述のように円偏光をセンシングファイバ2に伝播させるが、伝播中に円偏光が崩れたり、逆方向の円偏光に変換されると、位相差 ϕ sの検出に誤差を生じる可能性がある。このためセンシングファイバ2には、円偏光を保存する性質のある円複屈折性の光ファイバを用いることが望ましい。

【0030】また本実施形態では測定用の光を光ファイバで伝播させるようにしているが、これら光ファイバにおける光の結合損失を小さくするために、レーザ光のような空間的なコヒーレンスの高い光を測定用に用いることが好ましい。その一方で、各光学要素における接合部での戻り光による干渉の影響を抑えるために、時間的コヒーレンスの低い光をが望ましい。したがって光源10にはこのような要求を満足させる光を与える光源を用いることが望ましい。

【0031】また本実施形態については、左右各回り光の光路に温度差があると、これに起因して左右各回り光に位相差を生じ、これが計測誤差の要因となる可能性がある。そこで分岐から再結合までの光の伝播路を含むセンサ部21を単一の筐体中に設け、この筐体の外部を断熱材で覆うことにより、左右各回り光の光路に温度差を生じることのないようにするのが好ましい。

【0032】図5に第2の実施形態による光電流センサにおけるファイバ分岐結合部16の構成を示す。本実施形態では、第1の実施形態における光IC5が果していた光の分岐と再結合の機能をこのファイバ分岐結合部16に負わせている。すなわち図1におけると同様なファイバカップラ9からの光は偏光子8に入射してそこで直線偏光に変換され、それからファイバカップラ9aに入射する。ファイバカップラ9aでは光が分岐される。分岐光の一方は、第1の実施形態と同様なバイアス位相変調を施すための位相変調器6cに入射する。この位相変調器6cは、PZT等の圧電素子に光ファイバを周回させた構造であり、一定の振幅と周波数で駆動される圧電素子の伸縮を利用してファイバ長を変えることにより、バイアス位相変調を行う。分岐光の他方は、位相変調器6dに入射し、階段状の波形を持つデジタルセラロダイン位相変調を受ける。その位相変調器6dは、LiNbO₃の基盤上に形成した導波路の屈折率をポッケルス効果で変えることにより位相変調を行うものである。

【0033】図6に示すのは、第3の実施形態におるセ

ンサ部21と電流検出処理部22の接続に関する構成である。本実施形態では、測定用の光を電流検出処理部22からセンサ部21に伝送する伝送用ファイバ4の他に、図1における位相変調信号14a、14bを電流検出処理部22からセンサ部21に光信号を介して伝送するための信号伝送手段である信号伝送用ファイバ23と、図1における位相変調器6a、6bを駆動するための電力を光エネルギーに変換して電流検出処理部22からセンサ部21に供給するための電力伝送手段である電力伝送用ファイバ24を設けている。この結果、電流検出処理部22がセンサ部21から電気的に絶縁され、サージ電流の影響が電流検出処理部22に及ぶのを防止することができる。したがってサージ電流により電流検出処理部22の電子回路が破損されるような現象を防止でき、検出の安定性をより高めることができる。

【0034】図7に第4の実施形態による光電流センサの構成を示す。本実施形態は、基本的には第1の実施形態と同じで、光IC5から偏光変換部3a、3bに光を伝送する伝送用ファイバ4a、4bが長くなる点で異なっている。このように光IC5を経た後の光を伝送する伝送用ファイバ4a、4bが長くなる場合には、この両伝送用ファイバ4a、4bに振動などにより回転運動を生じると、サニャック効果により左右各回り光に位相差が発生し、これが誤差要因となる。その大きさは伝送用ファイバ4a、4bで囲われる面積に比例する。そこで、それぞれ1本の光ファイバで形成される伝送用ファイバ4a、4bを互いに絡み合わせてツイストさせることにより、伝送用ファイバ4a、4b同士の間隔を小さくすると共にこの間隔を固定化し、伝送用ファイバ4a、4bで囲われる面積を小さくしている。このように伝送用ファイバ4a、4b同士の間隔を小さくしてそれを固定化する方法としては、ツイストによる方法の他に、例えば伝送用ファイバ4a、4bを同一の被覆で覆う方法が可能である。

【0035】図8に第5の実施形態による光電流センサの構成を示す。本実施形態も基本的には第1の実施形態と同じで、図1における偏光変換部4の代わりにデポラライザ25を用いている点で異なる。すなわち偏光子8で直線偏光化された光をデポラライザ25で無偏光化し、これをセンシングファイバ2に伝播させている。このようにセンシングファイバ2を伝播する光を無偏光とすることにより、センシングファイバ2を伝播する際の光の直交成分間の干渉を抑えることができる。すなわち直交成分間の干渉による検出誤差を低減させることができる。また無偏光を用いることは、円偏光を伝播させることで円複屈折性の光ファイバを使用するのが好ましい条件となる場合と異なり、通信用などに広く用いられている石英製の光ファイバでも十分であり、したがって低価格化が可能となる。

【0036】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、ファラデ効果による両光の位相差を相殺して電流検出感度が常に一定にするための位相変調に階段状の波形となるデジタルセロサイン位相変調を用いるので、最大位相差が例えば360degまでの測定範囲を可能とし、しかも比較的応答性が低くて済む実用性の高い位相変調器を用いることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施形態による光電流センサの構成図である。

【図2】図1の光電流センサにおけるデジタルセロサイン位相変調の波形図である。

【図3】電流が交流である場合の図2相当の波形図である。

【図4】図1の光電流センサにおける偏光変換部の構成図である。

【図5】本発明の第2の実施形態による光電流センサにおけるファイバ分岐結合部の構成図である。

【図6】本発明の第3の実施形態による光電流センサの部分構成図である。

【図7】本発明の第4の実施形態による光電流センサの

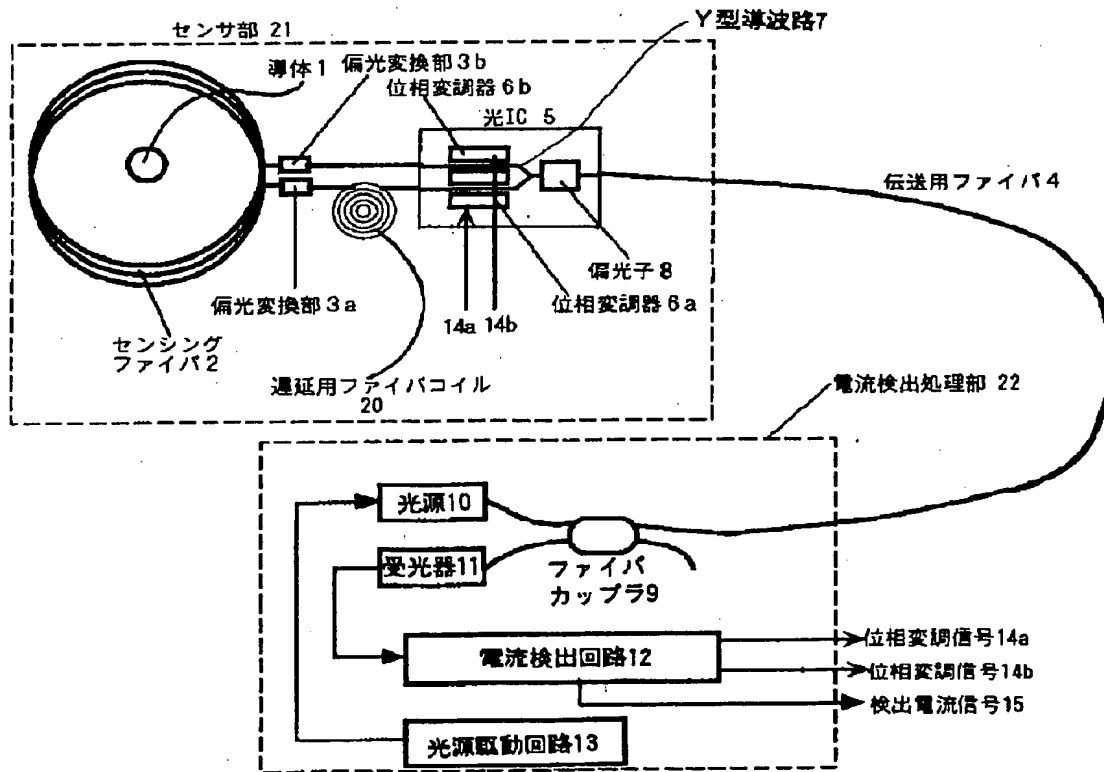
構成図である。

【図8】本発明の第5の実施形態による光電流センサの構成図である。

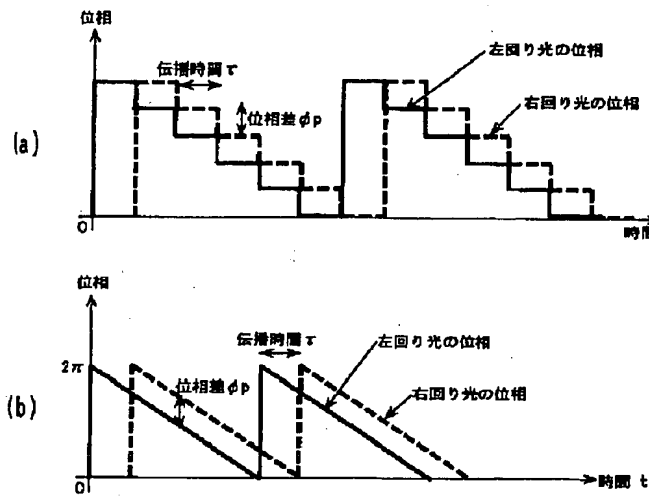
【符号の説明】

- | | |
|----|-------------------|
| 1 | 導体 |
| 2 | センシングファイバ（ファラデ素子） |
| 3 | 偏光変換部 |
| 4 | 伝送用ファイバ |
| 5 | 光IC |
| 6 | 位相変調器（第1の位相変調手段） |
| 7 | Y型導波路（分岐手段、再結合手段） |
| 8 | 偏光子 |
| 10 | 光源 |
| 11 | 受光器（検出手段） |
| 12 | 電流検出回路（変調信号発生手段） |
| 20 | ファイバコイル |
| 21 | センサ部 |
| 22 | 電流検出処理部 |
| 23 | 信号伝送用ファイバ |
| 24 | 電力伝送用ファイバ |
| 25 | デボラライザ |

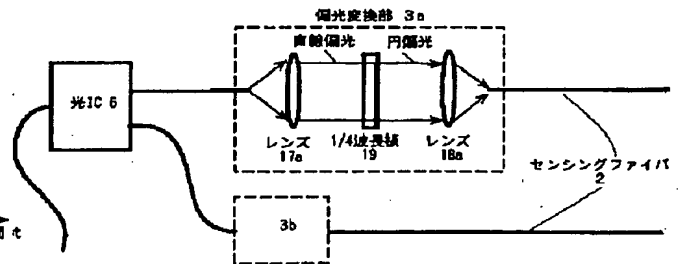
【図1】



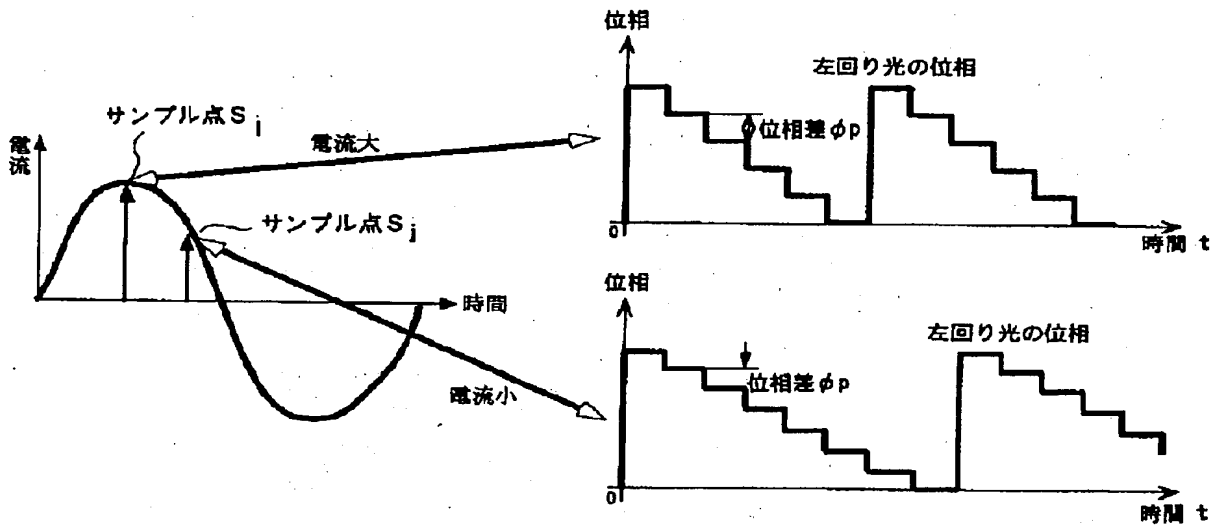
【図 2】



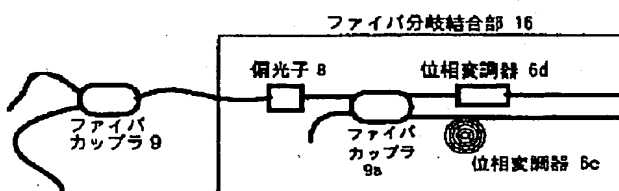
【図 4】



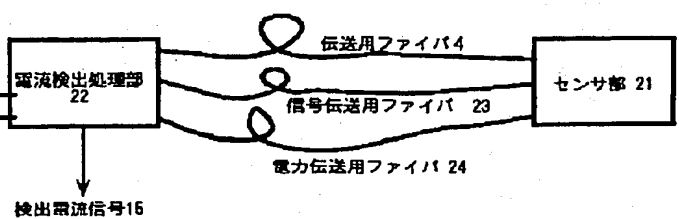
【図 3】



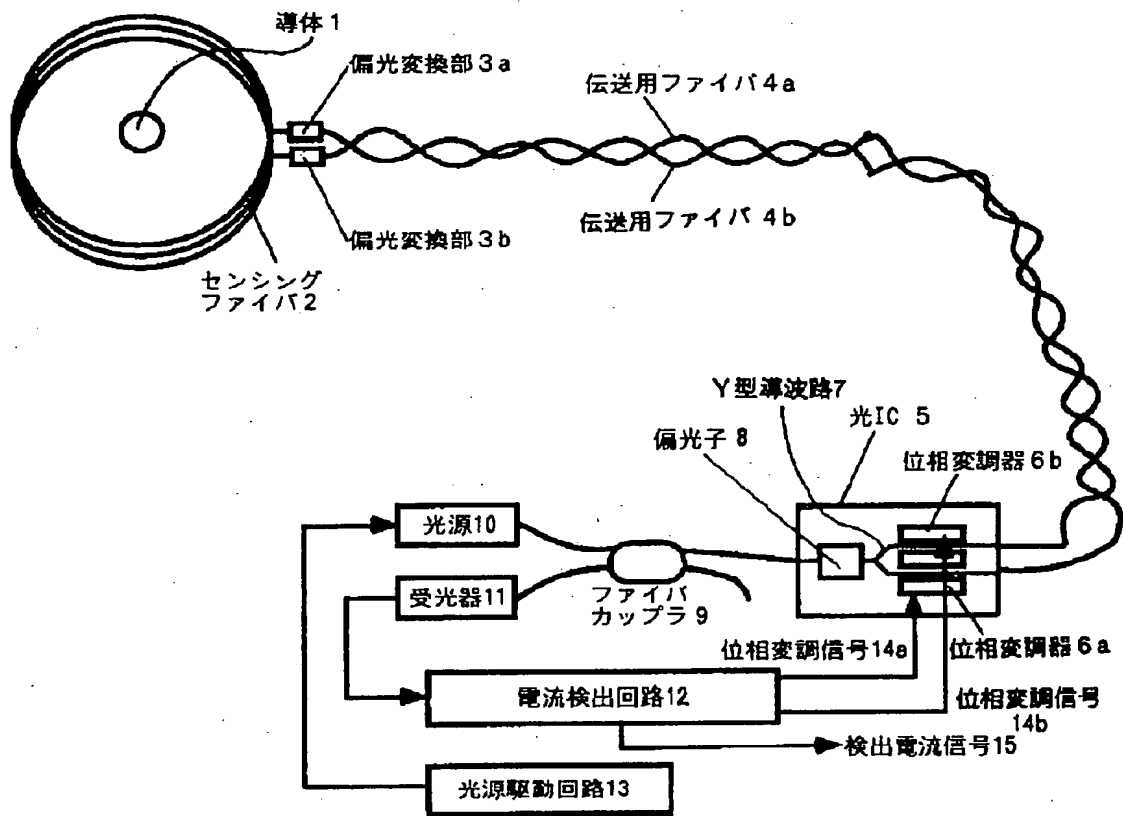
【図 5】



【図 6】



【図 7】



【図 8】

